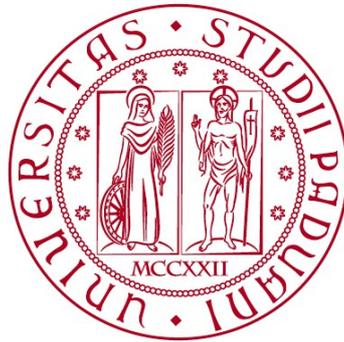


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**POSA DELLE TUBAZIONI RIGIDE NEI TERRENI  
CON FALDA**

**Relatore: Prof. Andrea Defina**

**Laureando: Lorenzo Cerreto**

**ANNO ACCADEMICO 2022-2023**

## INDICE

<b>CAPITOLO 1: Introduzione</b>	<i>pag. 1</i>
<b>CAPITOLO 2: I problemi determinati dalla presenza della falda</b>	<i>pag. 3</i>
2.1) Effetti prodotti dalla falda nel sistema tubo terreno	<i>pag. 3</i>
2.2) Valutazione delle condizioni di posa e ipotesi di intervento sul tubo e sulla falda	<i>pag. 3</i>
<b>CAPITOLO 3: Drenaggio delle acque di falda</b>	<i>pag. 5</i>
3.1) Indagini preliminari	<i>pag. 5</i>
3.2) Valutazione della portata da aggottare	<i>pag. 5</i>
3.2.1) Calcolo della permeabilità del terreno	<i>pag. 6</i>
3.2.2) Calcolo della portata da agottare	<i>pag. 7</i>
3.3) Metodi di drenaggio	<i>pag. 7</i>
3.3.1) Pompe di aggottamento	<i>pag. 8</i>
3.3.2) Well-Point	<i>pag. 9</i>
3.3.3) Well-Point con eduttore a getto	<i>pag. 10</i>
3.3.4) Creazione di vuoto attorno al pozzo	<i>pag. 11</i>
3.3.5) L' Elettrosmosi	<i>pag. 11</i>
3.3.6) Drenaggi orizzontali	<i>pag. 11</i>
3.3.7) Pozzi profondi	<i>pag. 12</i>
3.4) Metodi ad interruzione di flusso	<i>pag. 12</i>
3.4.1) Palancole metalliche e in cemento	<i>pag. 13</i>
3.4.2) Diaframmi in calcestruzzo e plastici	<i>pag. 14</i>
<b>CAPITOLO 4: La posa e collaudo delle tubazioni in trincea</b>	<i>pag. 15</i>
4.1) Realizzazione della trincea di posa e fasi precedenti alla posa	<i>pag. 15</i>
4.1.1) Fasi di realizzazione della trincea drenante	<i>pag. 15</i>
4.1.2) Tipologie di trincee	<i>pag. 16</i>
4.1.3) Esecuzione dello scavo	<i>pag. 18</i>
4.1.4) Posa dei geotessili	<i>pag. 18</i>
4.1.5) Uso del Trencher per la realizzazione della trincea	<i>pag. 20</i>
4.1.6) Formazione dell' angolo di appoggio in presenza di falda	<i>pag. 21</i>
4.1.7) Montaggio delle condotte	<i>pag. 22</i>
4.1.8) Rinfianco e rinterro delle condotte	<i>pag. 22</i>
4.1.9) Consolidamento (compattazione) del terreno	<i>pag. 23</i>
4.1.10) Tubazioni drenanti: definizione e posa	<i>pag. 23</i>
4.2) Prova di collaudo della condotta	<i>pag. 24</i>
4.2.1) Prova di tenuta	<i>pag. 24</i>
4.3) Introduzione alle tubazioni rigide	<i>pag. 25</i>
4.4) Classificazione delle condotte	<i>pag. 26</i>
4.4.1) Tubazioni rigide e deformabili	<i>pag. 26</i>
4.5) Verifica statica di una tubazione rigida	<i>pag. 27</i>

<b>4.5.1) Carico prodotto dal rinterro su una condotta rigida</b>	<i>pag. 28</i>
<b>4.5.1.1) Teoria di Bussinesq</b>	<i>pag. 28</i>
<b>4.5.1.2) Fattore di riduzione del carico</b>	<i>pag. 29</i>
<b>4.5.1.3) Fattore di concentrazione</b>	<i>pag. 31</i>
<b>4.5.2) Fattore di posa</b>	<i>pag. 31</i>
<b>4.6) Verifica a galleggiamento</b>	<i>pag. 33</i>
<b>4.6.1) Peso della condotta</b>	<i>pag. 33</i>
<b>4.6.2) Peso del volume d' acqua posto all' interno della tubazione</b>	<i>pag. 33</i>
<b>4.6.3) Peso del rinterro</b>	<i>pag. 34</i>
<b>4.6.4) Verifica al galleggiamento</b>	<i>pag. 35</i>

<b>CAPITOLO 5: Bibliografia e Sitografia</b>	<i>pag. 37</i>
--	----------------

## ***CAPITOLO 1: INTRODUZIONE***

Nella fase di posa delle tubazioni interrato, la falda freatica, la quale si trova nel sottosuolo, se posta ad un livello superiore rispetto al livello del fondo scavo previsto, può causare rilevanti problemi durante le operazioni di: scavo, di posa in opera e di riempimento. Inoltre può compromettere seriamente la stabilità della struttura se, logicamente, non viene adeguatamente, e preventivamente, risolto il problema. Proprio per tale motivo, bisogna minimizzare le problematiche che la falda potrebbe causare in fase di esecuzione dei lavori, ed è importante effettuare le verifiche necessarie in presenza di falda, oltre alle varie verifiche che vengono realizzate anche nel caso in cui la falda non dovesse dare dei problemi reali, come: la velocità di scorrimento dell' acqua, la pendenza della condotta, il grado di riempimento e via dicendo. Principalmente nella seguente discussione verranno spiegate due verifiche principali, la prima (verifica statica della condotta) necessaria per stabilire che le condotte considerate siano condotte rigide, e la seconda (verifica a galleggiamento) necessaria ogni qual volta venga considerato il problema della posa di condotte in terreni costituiti dalla presenza della falda.

Per garantire una stabilità dell' opera ottimale, e che questa rimanga costante nel tempo, è di fondamentale importanza che venga eseguita una corretta progettazione dei lavori, con le corrette verifiche, come detto precedentemente, e una buona esecuzione dei lavori stessi. In questa discussione faremo principale riferimento alla posa delle tubazioni rigide in terreni con falda.

Questa problematica è veramente importante soprattutto per diverse ragioni, in seguito sintetizzate dalla Normativa UNI EN 1610 (1999) "*Costruzione e collaudo di connessioni di scarico e collettori di fognatura*":

- le operazioni di scavo e le aree di esso devono essere mantenute prive di acqua e di possibili approvvigionamenti di essa;
- i metodi di drenaggio non devono andare ad influire sui materiali rivestenti la condotta e sui materiali stessi di quest' ultima;
- è importante evitare la perdita di materiale, da parte delle condotte, durante l' uso dei vari metodi di drenaggio, prendendo delle apposite precauzioni;
- infine, importante è considerare l' influenza del drenaggio sul movimento della superficie della falda e sulla stabilità dell'area circostante allo scavo.



## ***CAPITOLO 2: I PROBLEMI DETERMINATI DALLA PRESENZA DELLA FALDA***

In sede progettuale è molto importante sapere come gestire la progettazione di una condotta interrata con la presenza della falda, quindi, sapere gli effetti prodotti dalla falda stessa nel sistema tubo-terreno, per poi poter agire sugli eventuali problemi e poter trovare una risoluzione a questi ultimi.

### ***2.1) Effetti prodotti dalla falda nel sistema tubo-terreno***

La falda, come detto in precedenza, causa degli effetti sia nelle condotte che nel terreno, quindi nel sistema tubo-terreno:

- nel caso del terreno, ci sarà una variazione di vari parametri geotecnici, come:
  - *la diminuzione della capacità portante*, la quale si può limitare riducendo e limitando le tensioni massime sotto la condotta e stabilizzando il terreno di posa;
  - *aumento dei cedimenti*, che sono limitabili tramite l' aumento delle pressioni interstiziali, tra i vuoti del terreno, e la scelta di condotte con materiali adeguati;
  - *la diminuzione del grado di compattazione degli inerti*, risolvibile tramite l' aumento dell' energia di compattazione e l' impiego di condotte non deformabili, quindi rigide, verificandole con una verifica statica.
- per le tubazioni, l' acqua di falda generando una pressione andrà a generare a sua volta delle sollecitazioni aggiuntive applicate ad esse, come:
  - *la spinta di galleggiamento*, contrastabile principalmente grazie ad un' adeguata altezza della copertura, a delle condotte più pesanti e tramite un corretto rinterro;
  - *la sollecitazione radiale*, o buckling, trascurabile con condotte ad elevata rigidità anulare ed elevato spessore.

Tali informazioni fanno capire la pericolosità della presenza della falda durante le operazioni di posa delle condotte di fognatura o di distribuzione.

### ***2.2) Valutazione delle condizioni di posa e ipotesi di intervento sul terreno***

In funzione delle caratteristiche del terreno e del tipo di protezione dello scavo, ci sono vari comportamenti che il terreno può assumere, soprattutto in termini di stabilità, e diverse operazioni da effettuare sulla falda, in base alla problematica da risolvere e al contesto.

Quando è presente la falda, è di fondamentale importanza sapere con completezza tutte le caratteristiche del terreno, quindi sapere la sua stratigrafia, anche per sapere dove effettuare con precisione gli scavi. Tendenzialmente mediante operazioni di perforazione e sondaggio, verrà determinata una successione stratigrafica e verranno determinate le percentuali di sabbia, limo o ghiaia che costituiranno il nostro terreno, con la successiva granulometria e le varie caratteristiche geotecniche.

Importante, durante la fase di perforazione, è campionare il terreno che andrà in laboratorio per essere analizzato, per ricavarne le relative curve granulometriche e per essere sottoposto alle varie verifiche. I campioni possono essere definiti in base alle caratteristiche del terreno che possiamo determinare con essi in:

- *campioni indisturbati*: per la determinazione delle proprietà fisiche e/o meccaniche del terreno, e hanno la particolarità di conservare le proprie caratteristiche;
- *campioni disturbati*: non mantengono invariata la propria struttura e il contenuto d' acqua che contengono in essi, e sono utili per la determinazione della stratigrafia e delle proprietà indici.

Attraverso tutto ciò potremmo ricavare una prima stima della tipologia di drenaggi da utilizzare e del numero di pozzi necessari all'aggottamento (prosciugamento del fondo) delle acque degli scavi. Inoltre, a partire dall'esame granulometrico possiamo ricavare più caratteristiche di fondamentale importanza del terreno, ad esempio la permeabilità, la quale dev'essere stimata con accuratezza.

Tendenzialmente il terreno, e la condotta, devono garantire delle caratteristiche fondamentali per assicurare la stabilità dell'opera, le quali sono ancor più rilevanti se è presente una falda:

- *distribuzione dei carichi adeguata*, quindi che vengano trasmessi dalla condotta al terreno senza dar origine a tensioni concentrate sulla condotta che potrebbero andare a causare un'instabilità;
- una superficie di ripartizione adeguata per i carichi esterni, soprattutto quelli accidentali;
- la possibilità di esecuzione di una corretta giunzione, controllando i comportamenti in fase di collaudo.
- *un rinfianco laterale*, che vada a limitare le deformazioni delle tubazioni, le quali, oltre a portare un incremento delle tensioni, potrebbe creare problemi di tenuta da parte dei giunti. Il rinfianco laterale della condotta viene realizzato tendenzialmente tramite l'uso di sabbia costipata per evitare: cedimenti, riduzione dei vuoti e l'ovalizzazione della condotta. Sopra a questo strato, sarà presente il terreno in situ, separato dal rinfianco tramite un nastro segnalatore.

Le parti maggiormente importanti sono il letto di posa e il rinfianco laterale. Il letto di posa, tendenzialmente, deve garantire la presenza di una sella, che risolve le problematiche dovute alle giunzioni.

## **CAPITOLO 3: DRENAGGIO DELLE ACQUE DI FALDA**

Riguardante gli interventi sulla falda, l' intervento di maggiore importanza e rilevanza è la scelta e la fase esecutiva del sistema di drenaggio, utilizzato per prosciugare, o agottare, lo scavo insieme alla cassetatura delle pareti della trincea, per la successiva posa delle tubazioni, in modo tale che l' operazione possa essere effettuata in maniera corretta e in sicurezza.

Per normativa, se la falda, in prossimità della trincea, si trova ad un livello superiore rispetto al livello previsto per il fondo scavo, si dovrebbe avviare un' indagine per stabilire la realizzazione di un metodo adeguato per il suo controllo, quindi per la realizzazione della cassetatura delle pareti della trincea. Ovviamente, queste operazioni di drenaggio modificano definitivamente la nostra opera, senza possibilità di ritorno allo stato in cui si trovava prima dei lavori. Per tale motivo ci deve essere un accurata progettazione dei metodi di drenaggio e un accurato studio, in fase progettuale, prima di andare a realizzare effettivamente i lavori.

Le operazioni di drenaggio servono appositamente per ridurre i livelli della falda freatica, estraendone l' acqua che poi potrà essere riutilizzata per altri scopi. Di conseguenza in fase progettuale bisogna valutare tutte le conseguenze che potrebbe provocare il sistema di drenaggio ed effettuare tutte le verifiche, garantendo la stabilità dell' opera e scegliendo il metodo di drenaggio opportuno, in base a varie valutazioni.

### **3.1) Indagini preliminari**

La scelta del metodo di drenaggio di uno scavo viene valutata a seconda dalle caratteristiche del terreno di riferimento. Proprio per tale ragione, nella scelta del metodo da impiegare, è fondamentale svolgere in fase preliminare, quindi prima della progettazione, delle indagini, per andare a valutare:

- le condizioni geologiche dell' area di interesse dello scavo e in prossimità di essa;
- le dimensioni dello scavo da eseguire;
- il tempo di drenaggio;
- le caratteristiche geotecniche del terreno;
- il livello della superficie freatica e del carico idrostatico, al disotto dello scavo;
- gli effetti prodotti dall' abbassamento della falda freatica sugli edifici esistenti nei dintorni dell' area di lavoro.

Per verificare la stratigrafia del terreno di riferimento sarà necessario eseguire un determinato numero di sondaggi, in rapporto alle dimensioni effettive dello scavo da realizzare (ad esempio, la profondità del sondaggio deve essere 1,5 volte la profondità dello scavo), tramite un operazione di perforazione, la quale può essere eseguita in varie maniere, del terreno dove verrà realizzato lo scavo. Lo scopo di tali sondaggi è quello di ricavare le curve granulometriche, necessarie per valutare successivamente la conducibilità idraulica del terreno e poter scegliere, quindi, il metodo di drenaggio corretto.

### **3.2) Valutazione della portata da agottare**

Quando parliamo della portata da agottare, intendiamo la portata che bisogna allontanare dallo scavo, la quale può essere successivamente riutilizzata. Valutare tale portata è una fase di estrema importanza per la geometria dello scavo.

Come prima cosa bisogna quindi definire le dimensioni dello scavo, la profondità rispetto al piano campagna ed in rapporto alla superficie piezometrica della falda, e le estensioni planimetriche dello scavo.

### 3.2.1) Calcolo della permeabilità del terreno

Dopo aver effettuato i vari rilievi per la determinazione delle dimensioni dello scavo e delle sue estensioni, di importante rilevanza è il calcolo della permeabilità. Questo dev' essere fatto con cura, visto l' importanza del parametro per le successive fasi di realizzazione dell' opera.

Alla base del calcolo della permeabilità sono presenti i moti di filtrazione, i quali vengono ben definiti dalla legge di Darcy. Quest' ultimo studiò, tramite l' utilizzo di un permeametro a carico costante (strumento usato per il calcolo della permeabilità del terreno), le caratteristiche di filtrazione dell' acqua nel terreno (studiandolo in un terreno sabbioso).

Gli studi di Darcy hanno permesso di osservare che, in condizioni di moto laminare (che è il moto che consideriamo che si verifichi all' interno degli acquiferi), la velocità di filtrazione in un terreno permeabile è direttamente proporzionale alla perdita di carico idraulico e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso. La legge di Darcy si enuncia tramite la seguente formula:

$$V = k \cdot \Delta H / L = k \cdot i$$

in cui  $V$  è la velocità del flusso d' acqua che filtra nel terreno,  $k$  è il coefficiente di permeabilità,  $i$  è il gradiente idraulico, ricavabile tramite il rapporto del carico idraulico ( $\Delta H$ ) e la lunghezza del percorso di infiltrazione effettuato dall' acqua ( $L$ ).

Inoltre, considerando che la permeabilità di un terreno ha caratteristiche anisotrope, quindi varia a seconda della direzione considerata, la legge di darcy si può scrivere sottoforma differenziale, in cui, sapendo che:

$$\begin{aligned} dH/dz &= i \\ V_x &= -k \cdot i \end{aligned}$$

e trascrivendolo nelle tre dimensioni, è possibile ricavare il coefficiente di permeabilità  $k$ .

Quest' ultima è determinabile grazie a varie prove, descritte in seguito:

- Possono essere usati dei modelli idraulici che vanno a simulare il possibile moto di filtrazione di un fluido all' interno del terreno in base alla tipologia di moto considerato: permanente o stazionario. Questi andranno a ricostruire in maniera teorica il fenomeno di filtrazione dell' acqua, nel nostro caso, nel terreno, grazie ad un modello tridimensionale di quest' ultimo, il quale sarà suddiviso in microcelle, ognuna delle quali con caratteristiche di omogeneità e isotropia.
- Utilizzo dell' equazione di Laplace:

$$\text{div}(q) = 0 = \nabla^2(H) = 0$$

in cui con  $q$  si intende il flusso nelle tre dimensioni ipotizzando un mezzo poroso, saturo e omogeneo e  $\nabla^2$  va indicare un operatore differenziale, definito laplaciano.

L' equazione di Laplace è un modello matematico dei moti di filtrazione in condizioni stazionarie (ipotizzando nulla la variazione nel tempo del moto) in mezzo continui, isotropi e omogenei. Per definire un risultato definito, tramite l' uso di tale equazione, si dovrà andare a descrivere le condizioni al contorno del nostro sistema. La risoluzione non verrà descritta nel paragrafo seguente, basti sapere che quest' equazione è un' equazione differenziale di difficile risoluzione, per questo solitamente viene utilizzato il metodo precedentemente descritto.

### **3.2.2) Calcolo della portata da agottare**

Dopo, quindi, aver studiato le dimensioni dello scavo, l'andamento piezometrico della falda e aver calcolato la permeabilità, si andrà effettivamente a definire con certezza il battente idraulico da abbattere.

Per questioni di sicurezza si assumerà un franco di un metro sul battente idraulico da deprimere. Con franco idraulico intendiamo l'altezza libera che si lascia fra un livello che l'acqua non deve raggiungere, e quello massimo che effettivamente si consente venga raggiunto, pertanto si pianificherà l'aggottamento in modo che la superficie freatica si abbassi di un metro al di sotto della quota del fondo dello scavo.

La portata da agottare si calcola tramite l'utilizzo di formule analitiche che variano a seconda della scelta del metodo di drenaggio, per l'allontanamento delle acque di falda, descritti nel paragrafo successivo, e a seconda del tipo di falda presente nel nostro terreno (se freatica o artesiane). Per questioni di semplicità, e di argomento trattato, non andremo in questa sede a definire le varie formule del calcolo della portata di aggottamento.

### **3.3) I metodi di drenaggio**

La scelta del metodo di drenaggio, come già definito, è una della parte della progettazione più importante, dato che va a risolvere la maggior parte dei problemi dovuti alla presenza della falda, provocandone un abbassamento. Per la scelta del metodo di drenaggio ci sono vari parametri da considerare, in base ai quali si sceglie il metodo più adeguato:

- dimensione degli scavi di progetto;
- le caratteristiche granulometriche del terreno e la sua permeabilità;
- l'entità dell'abbassamento della superficie freatica e il gradiente idraulico;
- lo spessore della falda;
- la potenza elettrica necessaria e la capacità dei corpi idrici superficiali destinati alla recezioni delle acque di falda.

Esistono vari abachi, o tabelle, che mettono in funzione più parametri di quelli sopra elencati, per determinare quale dei metodi sia il più adeguato, ad esempio la *figura 1*, al di sotto riportata, mette in relazione la permeabilità e l'abbassamento della falda (drawdown):

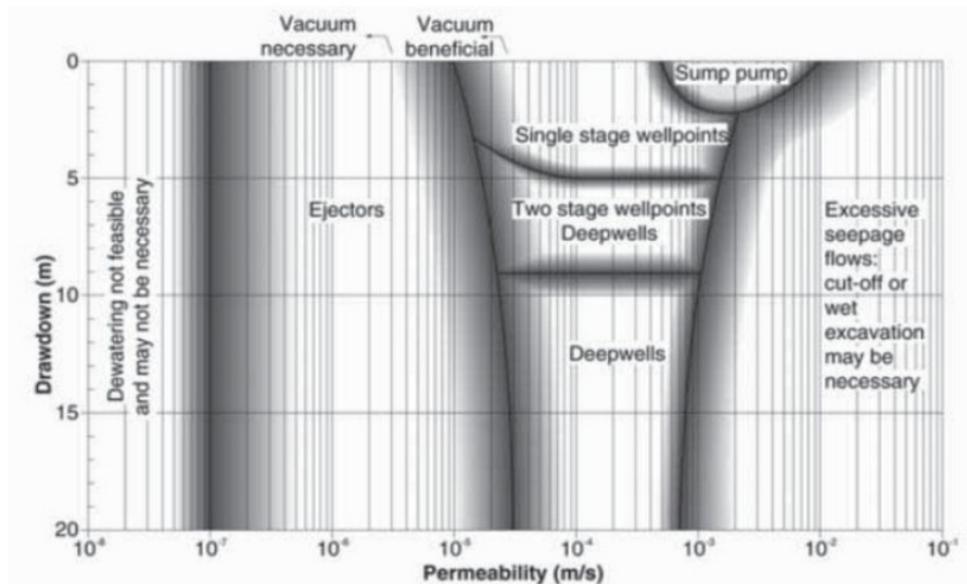


Figura 1. Metodi di drenaggio consigliati in base alla permeabilità e all'abbassamento di falda necessario

I metodi normalmente usati per il prosciugamento degli scavi in trincea solitamente sono le pompe operanti direttamente all'interno dello scavo, chiamate pompe di aggotamento, oppure i well points. I metodi di drenaggio verranno spiegati brevemente nei paragrafi successivi.

### 3.3.1) Pompe di aggotamento o aggotamento libero

Tale metodo è il più semplice per il prosciugamento delle acque in trincea, quello meno costoso e anche il metodo più rapido. Questo metodo viene utilizzato principalmente in tali casi:

- per degli scavi molto estesi e non troppo in profondità rispetto al livello dell'acqua, con una profondità limitata a 8 metri;
- terreni con filtrazioni d'acqua ridotte;
- terreni compatti coesivi, limosi/argillosi poco permeabili o ghiaiosi con elevata permeabilità;

Facendo attenzione ai coefficienti di permeabilità del nostro terreno, tale tecnica consiste nell'aspirazione diretta delle acque di falda tramite l'uso, appunto, di tali pompe di aggotamento (come quella in figura 2) fino al raggiungimento della quota desiderata.

Si useranno dei pozzetti di raccolta per raccogliere ed asportare l'acqua dallo scavo. Questi verranno posizionati negli angoli delle sponde, sulla quale si installeranno le pompe per l'estrazione dell'acqua. La scelta di queste ultime è molto importante, dato che da queste dipendono la dimensione dei pozzetti. Le pompe verranno scelte principalmente in base alla portata da aggotare, per evitare eventuali sostituzioni, che porteranno ad un allungamento dei lavori e ad uno spreco economico.

Se la portata che filtra all'interno dello scavo è tanto elevata da non poter essere raccolta in pozzetti, tutto lo scavo diventa un pozzo di raccolta e si dovrà operare con più pompe di aggotamento.

Al fine di evitare che le pompe, dal fondo del terreno, trascinino fuori delle particelle troppo piccole, sarà necessario mettere una casseratura di contenimento ad una quota inferiore rispetto a quella del fondo scavo, la quale si può anche rimuovere a fine degli interventi, in base alle scelte progettuali. Inoltre, se la conducibilità del terreno è tanto elevata sarà necessario intervenire tramite dei sistemi di impermeabilizzazione, per limitare gli effetti delle venute d'acqua.



Figura 2. Pompe di aggotamento in esecuzione

### 3.3.2) Well-Point

Questo metodo di drenaggio, visualizzato in *figura 4*, avviene tramite l' utilizzo di pozzi di veloce realizzazione con punte perforanti, che vengono infisse nel terreno tramite trivellazione a getto oppure lancia ad acqua ad alta pressione, e attraverso le quali viene aspirata l' acqua di falda. Questo è il metodo più diffuso, più veloce e più economico per l' abbassamento della falda all' interno del terreno. I pozzi di un sistema Well-Point sono collegati grazie a una rete di collettori di aspirazione orizzontali, posti in depressione con una o più pompe per assicurare l' emungimento continuo e interrotto dell' acqua di falda, a cui sono collegati delle tubazioni di sollevamento verticali che, all' estremità, hanno dei filtri, in sabbia di grana grossa.

L' impianto quando è in funzione provoca un abbassamento della falda creando un cono di influenza, dovuto alla depressione che va a crearsi e dipendente dalla conducibilità idraulica come raffigurato in *figura 3*, raffigurato in una porzione di terreno drenato a forma di cono rovesciato:

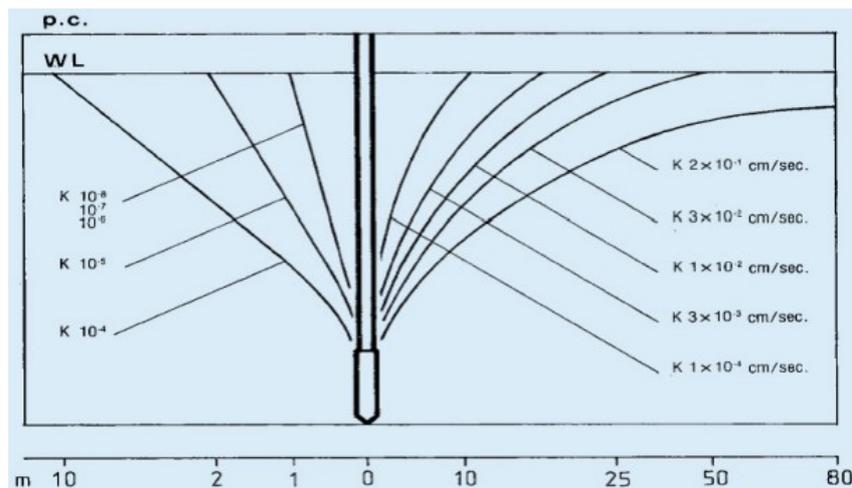


Figura 3. Andamento della conoide di depressione in funzione della conducibilità idraulica dei terreni

L'installazione di tale metodo avviene tramite un'operazione di perforazione di un foro e l'immissione del sistema Well-Point all'interno del foro stesso. Successivamente si collega il sistema ad una pompa a getto, la quale pompa acqua calda in pressione fino alla testa del Well-Point. La sua profondità di infissione varia a seconda della natura del terreno, della sua permeabilità e del livello di abbattimento richiesto rispetto al livello di falda indisturbata. In base al tipo di intervento potranno essere collegati più sistemi Well-Point vicini, ad un determinato interesse.

L'infissione del sistema Well-Point può essere effettuata in diverse maniere in base alla tipologia di terreno nella quale bisogna infissarle:

- in terreni sabbiosi per mezzo dell'azione di un gruppo di getti d'acqua a pressione;
- nei terreni stratificati si procede con l'ausilio di una trivella meccanica.

Questo metodo non può essere utilizzato per terreni con grossa granulometria, per la difficoltà di depressione della falda.

Il massimo abbassamento realizzabile, della falda, è di 7 metri circa. Inoltre il principio di funzionamento è controllato dalla legge di Darcy, tale per cui un terreno con bassa permeabilità ha un'elevata pendenza, e viceversa.

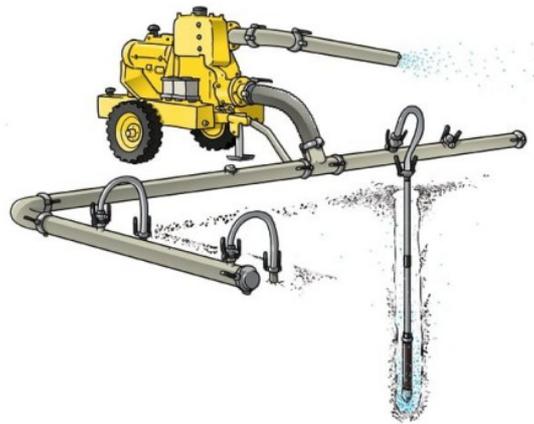


Figura 4. Sistema Well-Point

### 3.3.3) Well-Point con eduttore a getto

Il sistema Well-Point richiede l'utilizzo di aree molto ampie, e questo può causare dei problemi notevoli. Per tale motivo esiste il metodo del Well-Point con eduttore a getto, dato che:

- le punte arrivano ad abbassare la falda anche di 15/20 metri;
- non richiede uno spazio notevole;
- possono essere installati a distanze variabili tra gli 1,5 e gli 8 metri;
- massima portata di emungimento di 40/50 litri al secondo da ogni eduttore;
- ha una buona flessibilità d'impiego dell'impianto con possibilità di variare l'interesse tra i singoli Well-Point.

La punta è connessa alla condotta con manigotti, in parallelo, invece, sarà presente un'ulteriore condotta che farà circolare l'acqua in pressione e fa drenare verso l'alto l'acqua aspirata dal Well-Point. Alla base delle due linee ci sarà l'eduttore. L'acqua viene pompata in pressione fino a quest'ultimo, e tramite un tubo di venturi circolerà verso l'alto. L'acqua usata è l'acqua di falda che viene estratta e successivamente riciclata.

### 3.3.4) Creazione di vuoto attorno al pozzo

Un altro metodo è la creazione di vuoto attorno al pozzo e alla punta del Well-Point, aumentando, notevolmente, la variazione di pressione tra la falda e l'intorno della punta del Well-Point. L'acqua è espulsa proprio dall'annullamento della pressione neutrale attorno al filtro del Well-Point stesso, il quale verrà riempito con un materiale drenante, ad esempio, la sabbia.

Questo metodo viene utilizzato quando l'impiego per gravità non è funzionale.

### 3.3.5) L' Elettrosmosi

Per i materiali argillosi il Well-Point non funziona, anche secondo Darcy. Per tali terreni può essere usato il metodo dell' Elettrosmosi (figura 5), il quale fa circolare in maniera continua una corrente tra catodo (il pozzo) e l'anodo, i quali sono elementi metallici, trascinando con sé le particelle d'acqua, riducendo il contenuto d'acqua in quel tratto.

L'anodo ricevendo elettroni tende a consumarsi più velocemente.

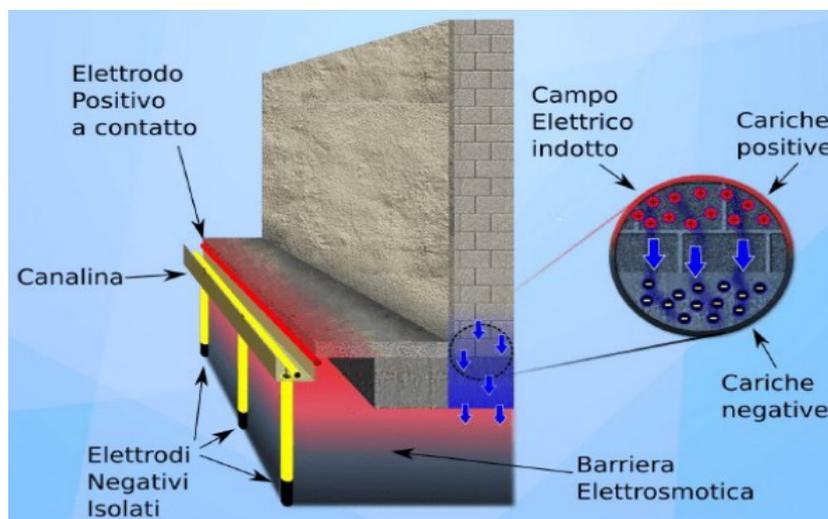


Figura 5. Elettrosmosi

### 3.3.6) Drenaggi orizzontali

I drenaggi orizzontali (figura 6) possono servire nel caso fosse necessario controllare il livello di falda e per deprimerla anche per lunghi tratti. Il drenaggio viene ottenuto grazie all'utilizzo di una tubazione micro-fessurata in PVC, posata ad una profondità di 0,5 metri rispetto a quella raggiunta dagli scavi. Dopo la posa di tratti di 100 metri, una parte della tubazione viene fatta emergere dal terreno e collegata a una pompa centrifuga autoadescante. Gli effetti sulla falda sono come quelli del Well-Point.

Ci sono dei vantaggi:

- assenza di tubazioni e manicotti flessibili in superficie, non ci sono ostacoli in tale maniera;
- possibilità di posare la tubazione drenante con largo anticipo rispetto agli scavi;
- velocità di esecuzione;
- risparmio economico.



Figura 6. Drenaggi orizzontali

### 3.3.7) Pozzi profondi

I pozzi profondi (figura 7) sono preferibili ai sistemi Well-Point nei casi di terreni permeabili, di una portata di una certa entità e, quindi, per un abbassamento significativo della falda. La progettazione deve definire:

- interasse tra i pozzi e diametro;
- metodo di perforazione;
- tipo e lunghezza del filtro da impiegare e sua profondità di collocazione;
- granulometria del dreno, quando questo si renda necessario.

La loro esecuzione è composta dalle seguenti fasi:

- perforazione;
- posa delle tubazioni definitive e dei filtri;
- formazione eventuale del dreno;
- cementazione e isolamento;
- sviluppo.



Figura 7. Pozzi profondi

### 3.4) I metodi ad interruzione di flusso

Tali sistemi, quando vengono applicati, impediscono il flusso dell' acqua nel terreno. Successivamente verranno descritti i due principali, e verranno tralasciati le *iniezioni* e il *congelamento*.

### 3.4.1) Palancole metalliche e in cemento

Le palancole metalliche (*figura 8*) sono componenti costruttivi che creano una parete infissa nel terreno con continuità, dovuta alla realizzazione di un incastro verticale. Vengono impiegate per contenere le spinte del terreno e dell' acqua. Questi elementi possono essere lavorati in due maniere differenti: laminati a caldo, quindi modellabili a proprio piacere grazie al riscaldamento del materiale; o profilati a freddo, quindi modellabili a freddo.

Possono essere usate in maniera temporanea, ad esempio per la protezione dell' area di scavo, o in maniera permanente, nella posa in opera di tubazioni, come nel nostro caso di studio.

Le palancole hanno, logicamente, un' opportuna profondità di infissione e necessitano di un supporto alla testa, soprattutto quando i carichi agenti e le dimensioni delle pareti sono di notevoli dimensioni. Tale supporto viene eseguito principalmente tramite travi di calcestruzzo o profili in acciaio.

La loro posa in opera avviene, come detto, tramite infissione. La profondità dipende dall' entità dei carichi e dalle condizioni del terreno. Possono essere infisse tramite:

- *percussione*: tramite l' uso di martelli in caduta libera, diesel o a doppia azione;
- *vibrazione*: consentendo una riduzione dell' attrito tra palancole e terreno, facilitando l' infissione tramite l' uso del martello.

Per motivi di sicurezza acustica, nel caso del metodo per percussione, verranno usate delle presse ai fini di limitare logicamente i rumori per percussione. Per questo motivo la vibrazione è il metodo di infissione preferito, dato che a livello di inquinamento acustico è notevolmente migliore, creando anche minor disagio agli edifici circostanti.



*Figura 8. Palancole metalliche*

Le palancole in cemento (*figura 9*) hanno le stesse funzionalità delle palancole in metallo, ma hanno come differenza di essere principalmente prodotte in maniera prefabbricata e sono utilizzate principalmente per opere di sostegno. Vengono utilizzate per delle altezze limitate, questo dovuto al fatto che può esserci un problema di trasporto, al contrario di quelle in acciaio che possono essere saldate o bullonate direttamente in cantiere, occupando delle luci completamente maggiori. Tendenzialmente sono in cemento armato, questo per migliorare la resistenza a trazione tramite l' utilizzo delle armature, dato che il calcestruzzo è debole a trazione.



*Figura 9. Palancole in cemento armato*

### **3.4.2) Diaframmi in calcestruzzo e plastici**

I diaframmi (*figura 10*), o paratie, sono, sostanzialmente, dei muri di cemento armato immessi nel terreno tramite uno scavo che viene realizzato con appositi macchinari, in grado di realizzare uno scavo di dimensioni variabili. Lo scopo di tali opere è di contenimento dell' acqua, tramite pareti gettate nel terreno. I diaframmi, come detto, sono principalmente realizzati in cemento armato, ma possono anche essere realizzati in plastica.

Queste vengono usate per opere di sostegno di importante capacità e per la realizzazione di barriere impermeabili, con lo scopo di evitare lo scivolamento del terreno all' interno dello scavo. Questa tecnologia consente di lavorare in quasi tutti i tipi di terreni, con cantieri di ridotte dimensioni.

Possono essere gettate in opera oppure possono essere prefabbricate. Inoltre, delle volte, quando la spinta del terreno è troppo elevata, il solo diaframma non riesce a sostenere l' opera, per questo verranno inseriti in aggiunta, al suo interno, dei tiranti, denominati anche paratie tiranti.



*Figura n. 10: "Diaframmi in calcesruzzo"*

## **CAPITOLO 4: LA POSA E COLLAUDO DELLE TUBAZIONI IN TRINCEA**

Nella maggior parte dei casi, come sappiamo, le condotte vengono posate tramite una semplice operazione di rinterro, ad una determinata profondità, al di sotto del piano campagna, o ancora più frequentemente, al di sotto del piano stradale. Vediamo che nel caso di tubazioni per un acquedotto, è necessario interrare le condotte ai fini di proteggere le acque convogliate all' interno delle tubazioni; mentre ne caso di condotte fognarie, è necessario per il raccoglimento delle acque nere, delle utenze dei vari insediamenti, e delle acque meteoriche, raccolte per gravità dalle superfici.

In funzione dell' utilizzo effettivo della tubazione e in base alle condizioni e alle caratteristiche del terreno verrà definita la profondità di posa della tubazione stessa.

In tale paragrafo tratteremo la posa delle tubazioni, nel caso di uno scavo a trincea, detto anche a sezione ristretta, con il quale si intende quegli scavi con dimensioni vincolate in cui la lunghezza e la larghezza sono inferiori alla profondità.

Questi tipi di scavi vengo utilizzati per la posa di tubazioni, o per scavi di fondazione.

### ***4.1) Realizzazione della trincea di posa e fasi precedenti alla posa***

Come prima fase, per la realizzazione della trincea, c' è la realizzazione dello scavo nella quale verrà inserita la trincea stessa. Questo dovrà rispettare la normativa di riferimento, norma UNI EN 1610, e le prescrizioni descritte in tale normativa.

Tendenzialmente le trincee vengono realizzate nel caso di operazioni da effettuare nei centri urbani. Sono realizzate a parete verticale e tramite uno scavo armato, garantendo maggiore stabilità. Bisogna, inoltre, garantire uno scavo regolare, tenendo conto delle dimensioni delle opere di sostegno.

#### ***4.1.1) Fasi di realizzazione della trincea drenante***

Tradizionalmente, la realizzazione della trincea prevede, come già detto, prima la realizzazione di uno scavo, di forma trapezoidale, per poi eseguire il riempimento, tramite l' uso di materiale arido e altamente permeabile.

Precedentemente alla posa del materiale appena definito, sul fondo della trincea verrà inserita una tubazione drenante. Successivamente eseguiremo l' operazione di riempimento, con il materiale di scavo, per poi compattare il tutto.

Le fasi esecutive possiamo elencarle come segue:

- esecuzione dello scavo;
- posizionamento del geotessile, il quale viene realizzato con lo scopo di essere un filtro-separatore;
- stesura del letto di ghiaia;
- posa del tubo drenante sul fondo della trincea;
- riempimento con materiale drenante (rinfiando e rinterro delle condotte);
- copertura con materiale impermeabile;
- trasporto del materiale scavato.

Successivamente andremo a classificare le trincee drenanti, per poi descrivere le varie fasi realizzative di esse.

#### 4.1.2) Tipologie di trincee

Possiamo classificare tre tipologie di trincee in base alle dimensioni del diametro nominale della condotta ( $d_n$ ), della sua profondità di posa ( $h$ ) e della lunghezza di base della trincea ( $B$ ) indicate in figura 11:

- *trincea stretta*: la sua condizione è che  $h \geq 2B$  se  $B \leq 3d_n$ ;
- *trincea larga*: con la condizione che  $h \geq 2B$  se  $3d_n < B \leq 10d_n$ ;
- *trincea infinita o terrapieno*: a condizione che  $h \leq 2B$  se  $B > 10d_n$ .

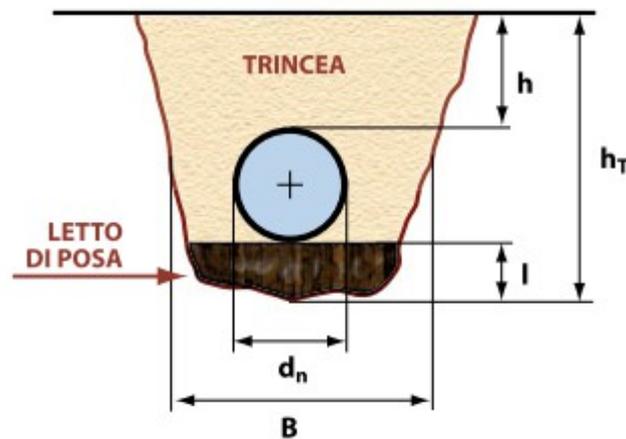


Figura 11. Dimensioni della trincea

Oltre a queste tipologie di trincee, classificate in base alle loro dimensioni, esistono altre classificazioni, ad esempio in base a se vengono realizzate in opera oppure se vengono realizzate in stabilimento, quindi realizzate in stabilimento:

- *Trincea infiltrante (o drenante)*: questa tipologia di trincea è realizzata con lo scopo di migliorare e favorire l' infiltrazione dell' acqua meteorica all' interno del terreno e, quindi, nel sottosuolo, grazie alla superficie superiore, ai lati e al fondo della trincea. Le ultime due parti della trincea, in particolare, favoriscono proprio il passaggio dell' acqua nel sottosuolo. Queste opere hanno anche la capacità di rimuovere un' ampia gamma di sostanze inquinanti dalle acque meteoriche (dovute generalmente dal dilavamento atmosferico e dalla corrosione della superficie sulla quale avviene la precipitazione). Gli scavi di tali trincee sono, tendenzialmente, di forma rettangolare, e vengono successivamente riempiti con del materiale inerte ad elevata permeabilità, attraverso il quale si trasporta l' acqua infiltrata. Quest' ultima può essere anche trasportata grazie all' adozione di una tubazione drenante che viene collocata alla base della trincea. Per evitare l' intasamento, dovuto ai materiali fini presenti all' interno delle acque infiltrate, lo scavo può essere rivestito di strati di tessuto non tessuto.

La struttura delle trincee si può suddividere in 3 strati diversi:

- *strato superficiale*, caratterizzato dalla crescita della vegetazione, la quale ha il compito di migliorare notevolmente la permeabilità del terreno;
- *strato sabbioso*, anch' esso con un' ottima capacità di migliorare la filtrazione;
- *strato ghiaioso*, o con materiale ad alta granulometria e ad alta permeabilità, questo per migliorare l' accumulo dell' acqua piovana.

Come notiamo, siamo caratterizzati da una stratigrafia con una conducibilità idraulica che va ad aumentare dall' alto verso il basso.

Sarà fondamentale per l' allontanamento delle acque in eccesso posizionare uno scarico con un pozzo di osservazione al fine di evitare possibili inondazioni in superficie.

Le trincee drenanti hanno il vantaggio, rispetto ad altri sistemi di drenaggio, di richiedere poco spazio per la propria installazione, oltre ad avere la possibilità di essere interrate come descritto successivamente. Proprio per questi motivi sono molto idonee a spazi urbani insediati. Dall' altra parte della medaglia, ci sono gli elevati costi di costruzione e manutenzione, oltre alla possibilità di intasamento, se non vengono effettuati con massima attenzione i lavori.

Alla base della progettazione di una trincea drenante bisogna considerare:

- la permeabilità del terreno, importante per qualsiasi sistema di drenaggio e descritta nel *paragrafo 3.2.1*;
- le caratteristiche della falda e l' acqua all' interno di essa;
- il possibile inquinamento delle acque meteoriche dovuto sia al dilavamento atmosferico e sia alla corrosione del suolo, come già scritto in precedenza.

Anche il dimensionamento deve considerare alcuni parametri importanti:

- le portate in arrivo nel sistema;
- la capacità di infiltrazione del terreno;
- il volume invasato nel sistema.

- *Trincea drenante prefabbricata (figura 12)*: realizzata in stabilimento, consente il drenaggio delle acque meteoriche grazie all' utilizzo di pannelli ad alte prestazioni idrauliche e meccaniche. Tali pannelli sono costituiti da uno scatolare esterno e da una rete metallica all' interno. Il tutto viene rivestito da uno strato di geotessili (spiegato nel *paragrafo 4.1.4*). La parte che permette il principale drenaggio è realizzata in polistirolo, garantendo un' ottima resistenza agli attacchi chimici.



Figura 12. Trincee prefabbricate

Inoltre possiamo fare un' ulteriore classificazione, a seconda del posizionamento delle trincee:

- *in superficie*: le quali ricevono il deflusso dalle aree adiacenti alla trincea stessa;
- *nel sottosuolo*: queste, al contrario di quelle in superficie possono ricevere il deflusso anche da altre reti drenanti. Però dovranno essere trattate ulteriormente, rispetto ai trattamenti che già normalmente si effettuano, questo per impedire ulteriori ostruzioni. Il fatto di poter posizionare le trincee al di sotto del terreno è un grandissimo vantaggio, anche per una questione di spazio occupato e di estetica.

#### **4.1.3) Esecuzione dello scavo**

Come già detto, lo scavo (*figura 13*), da realizzare per una trincea drenante, è di forma trapezoidale e, per profondità superiori al metro e cinquanta, le attuali normative prevedono l' utilizzo delle armature in acciaio.

Il procedimento di realizzazione dello scavo, per la posa delle condotte, viene definito blindo-scavo, il quale è adatto per terreni ghiaiosi e per terreni coesivi e compatti. Questo verrà utilizzato per effettuare lo scavo in sicurezza e per garantire la stabilità del terreno. In generale, consiste nell' affondamento del blindo-scavo nella trincea, man mano che lo scavo prosegue verticalmente. Quindi parliamo di un' opera di sostegno auto-affondante. Successivamente a ciò, il blindo-scavo verrà estratto, e lo spazio da essi occupato in precedenza verrà occupato dal terreno di rinfianco. Ciò andrà a causare una modifica al grado di compattazione di quella zona del terreno e, anche, agli sforzi agenti sulla condotta, dovuti al terreno di rinfianco. Per tal motivo, sarebbe un' ottima scelta estrarre gradualmente il blindo-scavo e in contemporanea ricompattare il rinterro.

Questo appena visto viene realizzato come detto per terreni ghiaiosi e terreni coesivi e compatti. Nel caso di terreni sabbiosi, limosi e argillosi, con la presenza della falda, andremo a proteggere lo scavo tramite l' uso di palancole ad infissione. Le operazioni necessarie per proteggere lo scavo quindi saranno le seguenti:

- tracciare il pre-scavo, come linea guida per lo scavo, come indagine preliminare;
- infliggere le palancole, grazie all' utilizzo di un maglio battente, realizzando una doppia fila, oppure tramite vibrazione, causando meno disturbo acustico;
- effettuare, come operazione finale, l' operazione di scavo.

Nel caso di uno scavo con una profondità troppo elevata, al fine di reggere e "annullare," le spinte orizzontali, bisognerà considerare la possibilità di utilizzo delle controventature.

Successivamente si provvederà ad abbassare la falda, e ad eseguire le operazioni descritte nei paragrafi precedenti, proprio per il fatto che, la presenza della falda nel terreno, può compromettere la stabilità del sistema.



*Figura 13. Esecuzione dello scavo per la realizzazione della trincea drenante*

#### **4.1.4) Posa dei geotessili**

La stesura (*figura 14*) dei geotessili avviene al fine di separare il terreno dal materiale drenante, ovviamente considerando determinati requisiti, definiti da normativa, di permeabilità e ritenzione delle particelle.

Quest' ultima avviene tramite un'operazione di vagliatura o setacciamento del terreno, in quanto le particelle verranno trattenute sul filtro del vaglio o del setaccio, a causa della dimensione del loro diametro, il quale è maggiore rispetto ai pori degli strumenti usati.

Un'ulteriore funzione di tale strato è la sua funzione da filtro di scarico.

Quindi, dopo tali considerazioni, possiamo dire che il suo utilizzo avviene sia per la separazione stratigrafica del terreno e sia per opere di filtrazione.

Molto importante è la durabilità che deve garantire questo strato di terreno, soprattutto nel caso di terreni tanto aggressivi, chimicamente parlando.

Facciamo, adesso delle considerazioni di tale strato, in base alla funzione che deve adempiere.

In termini di filtrazione:

- ha lo scopo di far filtrare le particelle del terreno per permettere all'acqua di raggiungere il nostro sistema di drenaggio. Proprio per questo la sua permeabilità dovrà essere maggiore rispetto alla permeabilità stessa del terreno;
- la sua progettazione dovrà avvenire in modo tale da evitare l'ostruzione del sistema, che può essere causata dall'eccessiva elevatezza della granulometria del terreno;
- la scelta, in fase progettuale, del geotessile, a proposito del suo scopo, verrà fatta proprio in base alle sue capacità permissive (di tolleranza) e alla sua capacità di filtrazione. Proprio per tali caratteristiche, la dimensione dei pori del terreno è un parametro importante da considerare per la sua progettazione;
- dovrà essere realizzato in modo tale che il materiale costituente sia resistente a possibili forature, agli agenti chimici e alla putrefazione.

Infine, in termini della capacità di separazione:

- ha lo scopo di fungere da barriera permeabile tra i diversi strati del terreno e le sue diverse composizioni e tessiture;
- dev'essere resistente meccanicamente;
- avrà anche una funzione da strato antinquinamento, per il fatto che andrà a trattenere le particelle di una certa granulometria, che potrebbero essere soggette a carichi statici o dinamici.

Si noterà che i geotessili saranno coperti e avvolti, per non far perdere le sue capacità.



*Figura 14. Stesura dei geotessili*

#### 4.1.5) Uso del Trencher per la realizzazione della trincea

Definiamo il Trencher un macchinario che serve per la realizzazione della posa con una maggiore precisione, che può essere usato in sostituzione al sistema tradizionale di scavo a cielo aperto. Tale macchinario permette di realizzare lo scavo della trincea in funzione al diametro della condotta che verrà successivamente posata. Inoltre si definirà anche la profondità necessaria per la posa successiva delle tubazioni.

Tale metodo permette la realizzazione di una trincea molto più pulita e precisa rispetto alla realizzazione con il metodo tradizionale, andando anche a ridurre i tempi di posa e di ripristino dello scavo. Questo avviene per il fatto che il materiale residuo derivante dallo scavo sarà sicuramente di minore quantità rispetto a quello che ne risulterebbe tramite l'uso dell'escavatore.

Esiste una classificazione di questa tipologia di macchinari. In particolare esistono due tipi di trencher:

- *trencher gommati (figura 15)*: questi sono maggiormente agili e versatili, e vengono tendenzialmente indicati per l'utilizzo in ambito urbano e per tratti di media lunghezza, per il fatto che vanno a ridurre l'ingombro del cantiere;



Figura 15. Trencher gommato

- *trencher cingolati (figura 16)*: utilizzati principalmente per tratti per la posa di condotte di nuova realizzazione, di lunga tratta e di diametro considerevole (condotte per gasdotti, idriche e fognarie).



Figura 16. Trencher cingolato

#### 4.1.6) *Formazione dell' angolo di appoggio in presenza di falda*

Importante, per assicurare una stabilità corretta del nostro sistema, è la realizzazione di un letto di posa adeguato. Proprio a tal proposito, bisognerà progettare il sistema con cautela e accuratezza, e si dovrà, successivamente, realizzare il letto di posa che dovrà essere caratterizzato da un appoggio uniforme e da un ampio angolo d' appoggio.

Bisognerà quindi, per la corretta realizzazione della posa considerando un terreno con falda, verificare le caratteristiche e la consistenza del fondo scavo e seguire le prescrizioni realizzate in fase progettuale per l' eventuale bonifica del piano d' appoggio.

Una considerazione importante, è che, nel caso di trincee costituite da un materiale di granulometria molto fine, l' oscillazione della falda può andare a influenzare la stabilità del letto di posa. Infatti, se questo è caratterizzato da un terreno granulare si andrà a favorire il flusso dell' acqua tra i granuli del terreno, causando, successivamente, una perdita di supporto del letto di posa e, in contemporanea, della tubazione. Un metodo per andare ad evitare quindi il movimento di materiale fine e granulare è, quindi, avvolgere il letto di posa, il materiale geotessile (paragrafo 4.1.4) e il terreno di rinfianco (paragrafo 4.1.8), permettendo, in tal modo, all' acqua di circolare attraverso il letto di posa, ma non facendo muovere le particelle verso di esso, quindi mantenendole all' interno dell' intorno della trincea stessa, garantendo quindi la stabilità del sistema di trincea. In questa maniera andremo anche ad evitare che il materiale fine si muova verso il fondo dei pozzetti.

Vediamo successivamente delle indicazioni per le operazioni di costruzione del letto di posa in funzione del terreno in situ, come descritto dalla discussione svolta dal sito "gresnews.it" sulla posa delle tubazioni rigide nei terreni con falda:

- *Formazione del letto di posa in falda in caso di terreno ghiaioso di grossa granulometria.*  
In tal caso bisogna bonificare il piano di posa con un fondo in ghiaia, realizzando un letto di posa in ghiaino, con uno spessore che va dai 3 ai 15 mm.
- *Formazione del letto di posa in falda in caso di terreno coesivo e compatto.*  
Bisognerà realizzare un letto di posa in ghiaia, con uno spessore che va dai 10 ai 25 mm, a seconda del diametro nominale della tubazione.
- *Formazione del letto di posa in falda in caso di terreno sabbioso o limoso.*  
Formiamo un letto di posa di 150 mm, composto di ghiaia o breccia di granulometria di 25 o 50 mm, più un ulteriore strato, sempre di 150 mm, di ghiaino.
- *Formazione del letto di posa in falda in caso di limi "liquidi".*  
Si andrà a realizzare, per la formazione del letto di posa, uno strato di ghiaia o breccia, più uno strato di ghiaino, come nel caso precedente.
- *Formazione del letto di posa in falda in caso di terreno a ridotta portanza.*  
Quando il terreno, al di sotto della trincea, ha una bassa capacità portante e non è capace di supportare in modo adeguato il letto di posa, è necessario stabilizzare il fondo prima delle operazioni di posa della tubazione. Vediamo delle soluzioni:
  - realizzare il letto di posa con uno strato di ghiaia e breccia, una soletta di allentamento in calcestruzzo, aspettando poi il tempo necessario per la sua presa, e lo strato finale di ghiaino;
  - si può stendere un telo di geotessuto, più: uno strato di ghiaia, geocomposto a triplo strato, letto di posa e rinfianco in ghiaino, con una chiusura finale del geotessuto.

Realizzato il letto di posa, si potranno posare le tubazioni, montate in precedenza, e si potranno andare ad effettuare le operazioni di rinterro e di rinfiacco.

#### **4.1.7) Montaggio delle condotte**

Prima di realizzare la posa effettiva delle tubazioni, sarà di fondamentale importanza montare le condotte. Questo può avvenire anche per il semplice fatto di realizzare condotte maggiormente lunghe tramite l' utilizzo di condotte di lunghezza più piccola unite tra di loro.

Questa fase viene realizzata in maniera diversa a seconda delle dimensioni dei diametri delle tubazioni:

- i tubi di piccoli e medio diametro verranno montati grazie all' utilizzo di un travetto in legno e di una leva;
- le tubazioni di grande diametro saranno innestate tramite l' uso di un mezzo meccanico, proteggendo il punto di spinta sempre con un travetto di legno.

Nel momento della posa, le condotte dovranno essere allineate nel centro della trincea, tramite un appoggio continuo. Al di sotto del bicchiere, flangia usata per il montaggio delle condotte, bisognerà realizzare una nicchia per evitare che il giunto vada a toccare il fondo dello scavo.

Bisognerà, in fase progettuale, considerare la possibilità di gelo nelle condotte, dovute al fatto che vengono realizzate interrate, e quindi che possono essere posate su strati congelati del terreno, dove non passano i raggi solari e quindi in assenza di riscaldamento. Questo è un problema che porta alle fratture delle condotte e al blocco del flusso dell' acqua che circola all' interno di esse.

#### **4.1.8) Rinfiacco e rinterro delle condotte**

Per evitare danneggiamenti del letto di posa, del terreno di rinfiacco e di primo rinterro, è necessario ridurre i tempi tra l' operazione di scavo e rinterro. Possiamo suddividere l' operazione di rinterro in tre fasi diverse:

- *rinfiacco (o rincalzo)*: in tale fase andremo a riempire la zona della trincea compresa tra il letto di posa e la generatrice superiore del tubo, tramite l' utilizzo di un terreno privo di particelle vuote, quindi compattato (incoerente) o costipato con molta cura e tramite l' uso di attrezzi leggeri.
- *riempimento (o rinterro)*: importante per la stabilità strutturale, si andrà inizialmente a riempire con un materiale che non vada a danneggiare il sistema tramite possibili cedimenti. Il riempimento verrà effettuato a strati con uno spessore limitato, in base alle prescrizioni progettuali e in base alla normativa, e verrà ogni volta costipato prima di procedere con il riempimento dello strato successivo. In questa procedura bisognerà considerare le sollecitazioni dinamiche che verranno trasmesse alla tubazione (evitare, quindi, di transitare sopra i tubi, durante la fase di riempimento, con mezzi pesanti). Per aiutare questa fase potranno essere inserite delle opere di sostegno, che successivamente potranno essere rimosse;
- *copertura (o superficiale)*: la sistemazione di tale strato avviene in maniera diversa a seconda che questo venga eseguito in campagna oppure sotto una sede stradale. Nel primo caso gli scavi riempiranno fino a formare un "massimo" rispetto alle superfici preesistenti. Nel secondo caso servirà una sicura e agevole circolazione, per questo si effettuerà uno strato cilindrato e rullato.

I materiali usati per la realizzazione del rinfiacco, al fine di garantire la solita stabilità e la resistenza meccanica della condotta interrata devono essere conformi a ciò che è stato descritto nel paragrafo precedente (4.1.6, "Formazione dell' angolo di appoggio in presenza di falda"), e verranno definiti dall' apposita norma UNI, e valutati, ovviamente, in sede progettuale.

Per terreni sabbiosi e ghiaiosi è opportuno valutare la possibilità di utilizzare il geotessuto, per avvolgere sia il rinfiacco e sia il letto di posa, come descritto nel paragrafo 4.1.4. Il materiale di copertura, infine, dovrà essere previsto dal progetto, avendo cura nella compattazione, per evitare eccessive deformazioni del piano stradale.

#### **4.1.9) Consolidamento (compattazione) del terreno**

Come specificato nel paragrafo precedente, il procedimento di consolidamento del terreno è necessario per evitare delle possibili deformazioni del piano stradale, dovuto, ad esempio, al passaggio di veicoli pesanti, tramite la compattazione del terreno e quindi la diminuzione del numero di vuoti all' interno di essa, con il conseguente aumento della resistenza.

Tali tipologie di operazioni variano in base alle caratteristiche geologiche e geotecniche del terreno sulla quale andremo ad agire, per questo verranno precedute da sopralluoghi nella quale si andranno ad individuare vari parametri e caratteristiche geotecniche, in modo tale da valutare in fase progettuale il miglior metodo da eseguire per il tipo di terreno.

Ci possono essere svariati procedimenti di consolidamento del terreno. Vengono scelti in base alle migliori del terreno necessarie:

- miglioramento meccanico del suolo, tramite l' uso di rulli, piastre vibranti e via dicendo;
- miglioramento idraulico, tramite l' uso dei drenanti, elettro-osmosi e i vari sistemi di drenaggio elencati nel paragrafo 3.3;
- metodi di modificazioni fisiche e chimiche del terreno, tramite l' uso di miscelatura di additiva o iniezioni di resine.

Le resine sono uno degli strumenti di consolidamento più efficaci e meno invasivi. Queste funzionano semplicemente tramite l' iniezione nel terreno di una reazione chimica, che ha come effetto di riempire i vuoti presenti nel terreno, compattarlo e ridurre l' acqua interstiziale all' interno dei vuoti che lo compongono.

#### **4.1.10) Tubazioni drenanti: definizione e posa**

Le tubazioni drenanti (ad esempio quelle in *figura 17*) sono tubazioni che hanno lo scopo di estrarre l' acqua dal terreno, quando questa può andare a disturbare o a infliggere danni ad edifici circostanti alla zona considerata per le operazioni successive da svolgere, ad esempio in presenza di falda.

Possiamo definire queste opere "drenaggi tubolari", dato che sono caratterizzati dalla stessa messa in opera delle tubazioni fessurate. Quest' ultime sono tubazioni che presentano sulla loro superficie delle micro e macro fratture, di grandezza variabile in base alla granulometria del terreno di posa. Grazie a queste fratture, o fori, l' acqua può entrare nel tubo senza portarsi con sè residui terrosi, dato che non passano tra i fori. In tal modo, il terreno viene privato di acqua in eccesso, che defluisce in un punto di raccolta o in un pozzo.

Vediamo i passaggi per la posa delle tubazioni drenanti, usate per un sistema di drenaggio. Tali passaggi devono essere realizzati da una ditta specializzata, per fare in modo che il metodo sia il più efficace possibile. Quindi in sede progettuale bisognerà considerare anche il costo dovuto alle operazioni svolte da tali ditte.

Come prima cosa, bisogna realizzare una trincea di dimensioni corrette, quindi larga e profonda in base alla tubazione scelta, e in base alle prescrizioni definite in fase progettuale e in normativa. Per questo motivo è consigliato usare i trencher, descritti a paragrafo 3.2.5, dato che la realizzazione della posa viene effettuata appositamente in base alle dimensioni della tubazione che poserà successivamente.

Successivamente stendiamo un foglio di tessuto, non tessuto, attorno alle pareti dello scavo, il quale è un foglio di polipropilene il quale conferisce al terreno delle proprietà importanti:

- *flessibilità;*
- *resistenza;*
- *protezione.*

Successivamente si andrà a realizzare il letto di posa, sul quale andremo a posare le nostre tubazioni, e useremo il ghiaietto come riempimento del contorno della condotta, in modo tale da limitarne la deformazione (l'ovalizzazione).

Importante è garantire un estradosso del tubo fino a 40 cm sopra di esso. Poi si andrà a ricoprire il tutto con il tessuto, non tessuto, e infine si finirà con il riempimento tramite l'uso del terreno di riporto, con un costipamento effettuato con mezzi non eccessivamente pesanti.



Figura 17. Tubazioni drenanti flessibili in polietilene

#### **4.2) Prova di collaudo della condotta**

Il collaudo è una metodologia di "controllo qualità". Le operazioni di collaudo differiscono dal tipo di opera o prodotto da collaudare. Queste sono operazioni di riscontro della conformità.

##### **4.2.1) Prova di tenuta**

La prova di tenuta idraulica della condotta è una verifica di quest'ultima che viene effettuata ancor prima dell'operazione di riempimento della condotta e dell'operazione di giunzione, sempre di essa.

La prova si effettua nella maniera descritta in seguito. Si riempirà il tratto di interesse della condotta tramite l' utilizzo di una pompa, fino al raggiungimento di un valore di pressione, definita pressione di collaudo. Quest' ultima viene fissata dal capitolato e non dev' essere inferiore al valore definito da normativa. In particolare, la pressione di collaudo dev' essere almeno 1,5 volte la pressione di esercizio, la quale viene definita come: " il massimo valore di pressione che può verificarsi in asse della tubazione, per il più gravoso funzionamento idraulico del sistema, comprese le eventuali sovrappressioni determinate da prevedibili condizioni di esercizio".

Il limite inferiore della pressione di collaudo ( $P_C$ ) è pari a:

$$P_C = P_E + 1.96 \text{ MPa.}$$

I valori della massima sovrappressione variano a seconda della funzione della massima pressione idrostatica vigente.

Successivamente al raggiungimento della pressione di prova, si procede con l' ispezione della condotta stessa e dei giunti, in modo tale da poter individuare le eventuali perdite macroscopiche. La prova avrà esito positivo (sarà superata) se la condotta mantiene indeterminato il valor di tale pressione per un numero minimo di 6 ore e un massimo di 24 ore.

Se la prova ha buon esito, si procede al ricoprimento della condotta. Il metodo appena descritto si chiama *collaudo ad acqua*.

Esiste anche la possibilità di eseguire un' altra tipologia di collaudo, il quale si chiama *collaudo ad aria*. Questo metodo prevede la pulizie nelle zone terminali dei tubi, la successiva chiusura dei tratti di interesse, tramite l' uso di palloni otturatori, idonei per resistere alle pressioni necessarie e che consentono il riempimento della condotta stessa tramite l' utilizzo di aria compressa. Successivamente, come per il metodo precedente, le condotte sono sottoposte alla pressione dell' aria, e se la condotta mantiene tale pressione entro un range di ore, definito da normativa, l' esito della prova risulterà positivo.

#### **4.3) Introduzione alle tubazioni rigide**

Abbiamo visto come realizzare dettagliatamente una trincea e come effettuare l' operazione di posa della tubazione nel caso di terreno con falda. Successivamente andremo a trattare il caso delle tubazioni rigide, caratterizzate principalmente dalla loro verifica statica, dato che il procedimento di posa rimane invariato a quello precedentemente. Inoltre andremo a vedere anche una delle verifiche di maggior rilevanza da effettuare sulla falda: la verifica al galleggiamento.

Per quanto riguarda le condotte rigide, bisognerà, quindi, garantire determinate verifiche di sicurezza, come, ad esempio, la verifica per la pressione di esercizio, che sarebbe il massimo valore che possono verificarsi all' interno della tubazione per avere il comportamento più gravoso di essa, oppure la verifica strutturale, come detto precedentemente, per una tubazione rigida (dato che è l' argomento principale di tale discussione).

Prima di tutto bisogna definire le varie tipologie di tubazioni, e che possono essere realizzate con varie tipologie di materiali. Successivamente, verranno descritte le varie caratteristiche di alcune condotte, e verrà descritta la verifica statica delle condotte, che fa distinguere le condotte rigide da quelle deformabili.

#### 4.4) *Classificazione delle condotte*

Ci sono varie tipologie di condotte, le quali vengono classificate in base a diversi criteri.

Per le reti di distribuzione le condotte possono essere classificate, a seconda della loro effettiva funzione nella struttura, in condotte:

- *di avvicinamento;*
- *alimentatrici principali*, le quali sono l'ossatura principale della rete;
- *alimentatrici secondarie*, sono le confluenze, e in alcuni casi non vengono distinte dalle principali;
- *distributrici con servizio antincendio;*
- *distributrici.*

A seconda della tipologia del materiale che viene utilizzato per la loro realizzazione, esistono 3 tipologie di tubazioni:

- *tubazioni rigide*: le quali possono essere in gres, calcestruzzo e fibrocemento. Tenzialmente sono realizzate, però, in PVC. Tali tipologie sono meno deformabili rispetto alle successive e, di conseguenza, si romperanno in maniera più fragile.
- *Tubazioni semi-rigide*: le quali possono essere in acciaio o ghisa.
- *Tubazioni flessibili*: disponibili in PVC, PE, PP e PRFV.

Successivamente andremo a considerare, come già definito, la prima tipologia di condotte e la loro verifica statica, che le fa differire dalle altre.

Una volta realizzato il letto di posa, è possibile posare i tubi, come detto nel paragrafo 4.1.6. Per la posa dei tubi rigidi, l'unica particolarità è l'inserimento e la realizzazione di nicchie in corrispondenza delle giunzioni, per l'alloggiamento dei bicchieri, in modo tale che il fondo cilindrico della condotta vada ad appoggiarsi lungo il letto di posa in direzione longitudinale. Questo comporterà anche che le tubazioni rimangano appoggiate soltanto sui bicchieri, evitando collassi strutturali e aumentando, di conseguenza, la stabilità del sistema.

I bicchieri sono semplicemente delle giunzioni ad innesto, la quale ha il compito di garantire la tenuta idraulica e di assecondare i normali movimenti della tubazione, compresi quelli dovuti alle dilatazioni termiche.

##### 4.4.1) *Tubazioni rigide e deformabili*

La differenza sostanziale tra le tubazioni rigide e le tubazioni deformabili (o flessibili) sta nel calcolo di un coefficiente, definito coefficiente di elasticità in sito. Quest'ultimo viene definito come il rapporto tra la rigidità anulare e il modulo elastico del terreno:

$$R = S_n / E_g$$

in cui  $R$  è il coefficiente di elasticità in sito;  $S_n$  è la rigidità anulare della condotta, la quale è molto importante nel caso di carichi esterni alla condotta, dato che aumentando tale parametro aumenta la rigidità della tubazione stessa; e  $E_g$  è il modulo elastico del terreno, che varia in base alla composizione del terreno stesso.

Se il coefficiente di elasticità in sito è maggiore o uguale a  $1/12$ , le tubazioni si possono definire rigide. Viceversa se il coefficiente è minore di  $1/12$ , le tubazioni possono definirsi deformabili.

La rigidità anulare è la resistenza di un tubo alla deformazione verticale a seguito di un carico esterno lungo un piano diametrale. In forma analitica è pari alla moltiplicazione del modulo di elasticità a flessione trasversale (E) e il momento d' inerzia della parete della tubazione (I), frazionato al diametro nominale della parete della tubazione elevato alla terza (DN):

$$S_n = EI/DN^3$$

La deformabilità della condotta è influenzata, soprattutto, dai carichi esterni e interni agenti su di essa, sia durante le operazioni di installazione, per la quale bisogna fare molta attenzione, e sia per gli sforzi agenti durante la sua vita nominale. Tutti gli sforzi dipendono, ovviamente dall' interazione tubo-terreno. Se il tubo si deforma più del terreno che lo circonda, sarà sollecitato in modo minore, poiché deformandosi in maniera lieve coinvolge il terreno di rinfianco a collaborare alla resistenza.

Importante, ai fini di un buon comportamento idraulico e di una buona stabilità idraulica, è l' integrità strutturale della tubazione, da stabilire mediante una verifica statica, la quale verrà descritta, nei paragrafi successivi. Questa verifica consiste nell' accertare che i carichi agenti sulla struttura provochino tensioni e deformazioni ammissibili secondo la normativa di riferimento:

- se la struttura è *rigida*, la funzionalità è soddisfatta quando lo stato di tensione interno è compatibile con le tensioni ammissibili del materiale, definite dalle prescrizioni della normativa;
- se la struttura è *deformabile*, occorre verificare che la deflessione diametrale, che agirà sulla condotta, sia compatibile con i vincoli progettuali e che non si abbia schiacciamento, sempre della condotta, per instabilità elastica.

#### 4.5) Verifica statica di una tubazione rigida

Possiamo definire se una condotta idraulica è una condotta rigida, tramite l' uso di due formule differenti. La prima formula che verrà elencata successivamente è il metodo analitico di definizione di una tubazione rigida, di principale utilizzo e che verrà descritto maggiormente nel dettaglio. Possiamo quindi distinguere i due metodi:

- la prima formulazione analitica definisce che, una condotta rigida, è verificata staticamente se:

$$FS = (B_f \cdot F_N) / F_{tot} \geq FS_{Minimo}$$

indicando con  $B_f$  il fattore di posa, che verrà descritto successivamente al paragrafo 4.5.2; con  $F_N$  il carico necessario per generare la rottura del sistema; con  $F_{tot}$  la risultante di tutto il sistema di forze agente sulla tubazione; con FS il fattore di sicurezza a rottura della tubazione e con  $FS_{Minimo}$  il fattore di sicurezza minimo per la rottura della tubazione, posto tendenzialmente pari a 1,5.

Il fattore di sicurezza, inoltre, potrà essere incrementato in due modi principali: o agendo sull' incremento dell' angolo d' appoggio (descritto completamente nel paragrafo 4.1.6) oppure andando a scegliere una tubazione con una classe di resistenza maggiore, quindi che resiste a carichi più elevati, e di conseguenza andando ad aumentare il carico limite a rottura.

Il carico di rottura, per schiacciamento, viene ricavato, ovviamente, in laboratorio, tramite l' esecuzione di determinate prove. Successivamente a queste, si andranno a fare delle considerazioni importanti al fine di rilevare i carichi totali agenti sulla condotta: si andrà a valutare come la falda, e le varie modalità esecutive scelte in sede progettuale, vanno ad influenzare il carico prodotto dal rinterro sulla condotta.

Successivamente, si andrà a ricavare il parametro che gioca il ruolo più importante: il fattore di posa.

Tutto il procedimento fin qui descritto verrà realizzato, usando un ipotesi: il peso proprio della condotta e il peso del liquido che circola all' interno di essa verranno trascurati.

- La seconda metodologia analitica definisce che una tubazione rigida è staticamente verificata se:

$$Q_t \leq (K \cdot Q) / v$$

indicando con  $Q_t$  il carico esterno totale per schiacciamento; con  $Q$  il carico di rottura, sempre per schiacciamento; con  $K$  il coefficiente di posa; e con  $v$  il coefficiente di sicurezza allo schiacciamento, pari a un valore che varia da 1,3 a 1,5.

#### **4.5.1) Carico prodotto dal rinterro su una condotta rigida**

Possiamo definire il carico prodotto dal rinterro, applicato sulla condotta rigida, come la risultante delle forze verticali agenti sulla nostra tubazione, trascurando, come già definito per ipotesi, il peso proprio della condotta e del liquido circolante all' interno di essa. La relazione che definisce tale parametro è la seguente:

$$F_{tot} = \lambda_{RG} \cdot \gamma \cdot h \cdot k \cdot D_e + p_v \cdot D_e$$

in cui con  $\lambda_{RG}$  indichiamo il fattore di concentrazione del carico per una tubazione installata in trincea (paragrafo 4.5.1.3); con  $k$  il fattore di riduzione del carico (paragrafo 4.5.1.2); con  $\gamma$  il peso specifico del terreno; con  $h$  la distanza che intercorre tra la generatrice superiore della condotta e il piano stradale; con  $p_v$  la pressione esercitata sulla condotta dal carico stradale; con  $D_e$  il diametro esterno della condotta.

Il carico del rinterro agente sul tubo notiamo che è fortemente dipendente:

- dal metodo utilizzato per l' esecuzione del rinterro stesso e dalle modalità di rimozione delle opere di sostegno usate in maniera temporanea per la realizzazione dello stesso rinterro;
- dal metodo utilizzato per la realizzazione del rivestimento;
- dalle dimensioni geometriche della trincea;
- dalle caratteristiche geotecniche del terreno di rinterro, determinate in fase progettuale tramite varie prove che sono state definite durante tale discussione (ad esempio la granulometria del terreno).

Di queste influenze si tiene conto dei parametri che verranno descritti successivamente al paragrafo 3.5.1.1.

#### 4.5.1.2) Fattore di riduzione del carico

Il fattore di riduzione del carico viene definito dalla seguente relazione:

$$k = [1 - e^{-(2 \cdot K_1 \cdot h/b \cdot \tan \delta)}] / [2 \cdot h/b \cdot \tan \delta]$$

indicando con  $k$  il fattore di riduzione del carico stesso, come definito nel paragrafo 4.5.1; con  $b$  la larghezza dello scavo necessario per la posa delle tubazioni; con  $K_1$  il rapporto tra la tensione verticale e quella orizzontale che va a svilupparsi lungo lo scavo; e infine con  $\delta$  indichiamo l'angolo d'attrito, presente tra il terreno di rinterro e il terreno costituente la trincea.

Ovviamente, nel calcolo del fattore di riduzione di carico, sono di fondamentale importanza le pressioni laterali che si sviluppano nell'area presente tra lo scavo e il rinterro, visualizzabili sottoforma di tensioni tangenziali. Per tale motivo, infatti, il rinterro ha tale influenza sull'intensità degli sforzi appena definiti. Di fatto, la larghezza della trincea ( $b$ ) e il rapporto tra le tensioni verticali e orizzontali ( $K_1$ ) dipendono dalla modalità di realizzazione del rinterro, quindi possiamo definire varie classi di quest'ultimo (definite nella discussione svolta dal sito "gresnews.it" sulla posa delle tubazioni rigide nei terreni con falda) :

- **A1:** rinterro della trincea con strati di terreno compattati direttamente contro le pareti di scavo, senza controllo del grado di compattazione raggiunto;
- **A2:** rinterro della trincea con protezione delle pareti di scavo mediante opportune opere di sostegno provvisorie estratte gradualmente durante le operazioni di rinterro;
- **A3:** rinterro della trincea con protezione delle pareti di scavo mediante opportune opere di sostegno provvisorie estratte al termine delle operazioni di rinterro;
- **A4:** rinterro della trincea con strati di terreno compattati direttamente contro le pareti di scavo, con controllo del grado di compattazione raggiunto.

Il fattore di riduzione  $k$  può essere ricavato anche grazie a degli andamenti teorici in un diagramma (*figura 18*), realizzati in funzione del rapporto tra l'altezza e la larghezza della trincea e al variare del tipo di terreno per ciascuna classe di rinterro. Prima però definiamo le quattro tipologie di terreno esistenti, secondo la normativa:

- **G1:** sono terreni sabbiosi/ghiaiosi, ma non sono caratterizzati da plasticità;
- **G2:** sono terreni sabbiosi/ghiaiosi, caratterizzati da un 15% di limo;
- **G3:** terreni misti, con una frazione che va dal 15% al 30% sabbiosa/argillosa;
- **G4:** terreni limo/argillosi.

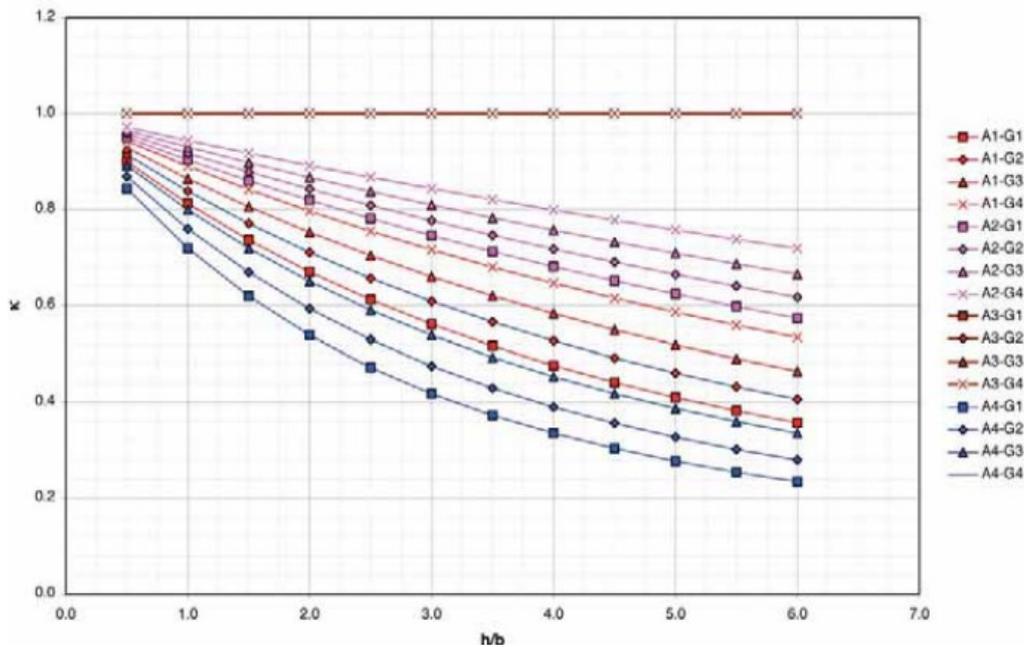


Figura 18. Andamento teorico del fattore di riduzione, in funzione a  $h/b$ , al variare delle classi di rinterro e della classe di terreno considerate

Dall'analisi del grafico si osserva che il fattore di riduzione del carico è fortemente dipendente dalla classe e dall'esecuzione del rinterro e dalla tipologia di terreno.

Tendenzialmente comunque dale parametro, per questioni di sicurezza, viene posto pari a 1, a meno chè non venga calcolato sperimentalmente.

#### 4.5.1.3) Fattore di concentrazione

La ripartizione del carico, che avviene tra la tubazione e il terreno che la circonda, è stabilito dal rapporto tra la rigidità della tubazione stessa e quella del terreno. Nel caso delle tubazioni rigide, le quali sono caratterizzate da un' elevata rigidità, il carico tende a concentrarsi principalmente nelle condotte. Tale fenomeno deve essere considerato in sede progettuale, e per tale motivo l' intensità del fenomeno viene definito da un parametro definito fattore di concentrazione del carico  $\lambda_{RG}$ .

Per questioni di complessità del problema non andremo a trascrivere la tattazione completa per il metodo di ricavamento di tale parametro, ma ci limiteremo a trascrivere i concetti teorici di maggiore importanza.

Tale parametro, nel caso delle tubazioni rigide, varia principalmente per variazione del rapporto tra la larghezza della trincea e il diametro esterno della tubazione ( $b/D_e$ ). Inoltre il fattore di concentrazione ( $\lambda_P$ ) stesso va a far variare il fattore di concentrazione del carico. Il fattore di concentrazione del carico varia, per tubazioni rigide, esclusivamente dal rapporto  $b/D_e$ , e dal fattore di concentrazione stesso  $\lambda_P$ .

Possiamo definire il fattore di concentrazione  $\lambda_P$  il valore che, se molitplicato con l' apposita tensione, permette di ricavare il massimo valore tensionale in corrispondenza della sezione del terreno considerata. Possiamo approssimare il nostro valore coincidendolo con il valore massimo del fattore di concentrazione stesso, il quale varia:

- *dai moduli di deformazione*: per la posa delle condotte in trincea si vanno a considerare quattro zone specifiche del terreno, per ognuna delle quali è presente un modulo specifico di deformazione (il tutto visualizzato in *figura 19*).

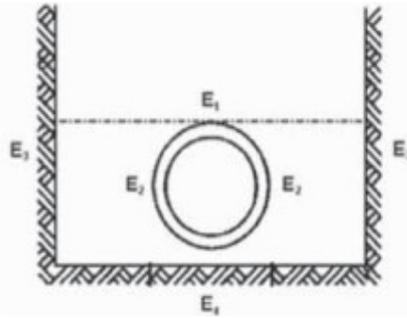


Figura 19. Moduli di deformazione per zona del terreno considerata

Descriviamo le 4 tipologie di moduli da considerare:

- $E_1$ : modulo del terreno di rinterro, quindi proprio al di sopra della condotta;
- $E_2$ : modulo del rivestimento del terreno, quindi la parte di terreno che affianca la condotta;
- $E_3$ : modulo del terreno costituente le pareti di rinterro;
- $E_4$ : modulo del terreno sottostante il fondo della trincea.

Il calcolo dei moduli di deformazione sarà in funzione a vari parametri a seconda di quale modulo di deformazione andiamo a considerare. Ad esempio il modulo di deformazione  $E_2$ , per il materiale di rivestimento della condotta, in presenza di falda dipenderà da un fattore che andrà a considerare la consolidazione del terreno, la presenza della falda in esso e da un fattore che tiene in considerazione l' influenza della larghezza dello scavo nei confronti del grado di compattazione del terreno di rinfianco ( $\alpha_B$ ).

Ovviamente, gli altri moduli di deformazione varieranno da ulteriori parametri. Ad esempio il modulo  $E_1$  varierà dalla presenza o meno di carichi di una certa entità.

- *dalla sporgenza efficace*: definita dal rapporto tra  $E_1$  e  $E_2$ , moltiplicato alla sporgenza relativa ( $\alpha$ ), questo parametro tiene conto di parametri geometrici e delle caratteristiche meccaniche del terreno.

#### 4.5.2) Fattore di posa

Prima di definire il fattore di posa, facciamo delle considerazioni. Il carico totale che viene applicato alla condotta è il risultato, principalmente (trascuando, come detto più volte, il peso della condotta stessa e del fluido circolante in essa) del peso del rinterro, dalla reazione generata dal letto di posa e dei carichi agenti sulla superficie del terreno. Il rinterro andrà a distribuirsi sulla parte superiore della condotta posata, mentre la reazione generata dal letto di posa andrà a distribuirsi sulla parte inferiore.

A causa della configurazione di carico precedentemente descritta, si andranno a generare dei momenti flettenti lungo l' area circonferenziale della condotta. Tali momenti dovranno, ovviamente, avere un valore inferiore rispetto al valore ricavato da laboratorio in fase progettuale, per questo la fase di progettazione dovrà essere effettuata con massima accuratezza. La prova di laboratorio viene definita "*3-Edge Bearing Test*". Come conseguenza di ciò, il carico per il raggiungimento del collasso della struttura reale sarà maggiore rispetto a quello da laboratorio, applicato nella prova.

Il valore massimo del momento flettente si andrà a generare nella parte inferiore della condotta, dovuto al fatto che la spinta superiore è di gran lunga maggiore a quella inferiore e con un braccio maggiore.

Possiamo ora definire il fattore di posa (Bf) come il rapporto tra il carico necessario per il collasso strutturale della tubazione reale e il valore ottenuto dalla prova "3-Edge Bearing Test". Il valore di tale parametro sarà influenzato dall'angolo di contatto che intercorre tra la parte inferiore della tubazione e il letto di posa.

Vediamo una visualizzazione di distribuzione dei carichi, come precedentemente descritta, di un tubo rigido nel terreno. In *figura 20* si vedrà chiaramente la spinta ascendente dovuta al letto di posa, sulla parte inferiore della tubazione, e la spinta per unità di lunghezza della tubazione dovuta al rinterro. Come si vede dalla figura, se la progettazione viene effettuata in maniera poco precisa, si causerà la deformazione della tubazione (limitata nel nostro caso, visto che parliamo di tubazioni rigide) provocando un effetto "cerchiante" di schiacciamento della condotta.

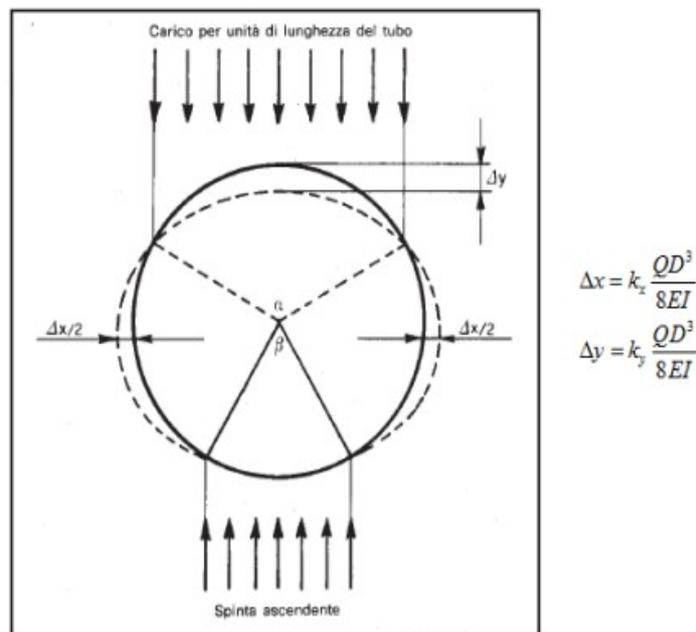


Figura 20. Modello di distribuzione dei crichi sul tubo rigido

Come definito, il fattore di posa varia a seconda degli angoli d'appoggio. Quest'ultimi, definiti in sede progettuale, dovranno essere effettivamente realizzati in posa in opera, dato che, come si vede dalla *tabella 1*, modesti angoli d'appoggio inducono a ridotti valori di fattori di posa e quindi fattori di sicurezza più bassi.

Angolo d' appoggio	Fattore di posa
0	0,121
60	0,103
90	0,096
120	0,09
180	0,083

Tabella 1. fattore di posa in funzione all' angolo d' appoggio

#### 4.6) Verifica al galleggiamento

Nel caso di tubazioni che vengono posate in terreni, costituiti dalla presenza della falda, è necessario effettuare la verifica a galleggiamento della condotta stessa, il quale fenomeno può dipendere da vari fattori. Ovviamente andiamo a considerare determinate ipotesi: la resistenza al taglio del terreno di rinterro lo consideriamo trascurabile per semplicità; infine il pelo libero della falda coincide con quello del piano campagna.

Successivamente andiamo a studiare i principali fattori che vanno a intaccare tale verifica.

##### 4.6.1) Peso della condotta

Il peso della condotta può essere calcolato in maniera analitica tramite la seguente formulazione:

$$W_p = \gamma_p \cdot (D_e^2 - D^2) \cdot \pi / 4$$

in cui indichiamo con  $W_p$  il peso della tubazione per unità di lunghezza; con  $\gamma_p$  il peso specifico della condotta, il quale varia, logicamente, in base al materiale usato per la realizzazione della condotta stessa; con  $D_e$  consideriamo, come definito in precedenza, il diametro nominale esterno della condotta e con  $D$  il diametro interno del gruppo (quindi la differenza tra i due diametri darà lo spessore della tubazione).

Questo parametro è importante per il semplice fatto che il suo peso va a generare una spinta sul terreno diretta verso il basso, che andrà a resistere alla spinta generata dall' acqua di falda.

##### 4.6.2) Peso del volume d' acqua posto all' interno della tubazione

Questo parametro è importante proprio perchè, come il peso stesso della condotta, va a generare una spinta stabilizzante dall' alto verso il basso sulla condotta immersa nell' acqua di falda, quindi contro alla spinta generata dall' acqua di falda. Per calcolare questo parametro si userà il principio di Archimede, il quale esprime il seguente principio: un corpo immerso in un fluido (nel caso nostro la condotta nell' acqua di falda) subisce una spinta dal basso verso l' alto con un valore pari al peso del liquido che viene spostato, dove la spinta del fluido viene definita o spinta idrostatica o spinta di Archimede. Per capire meglio il significato di tale principio, visualizzare la *figura 21*:

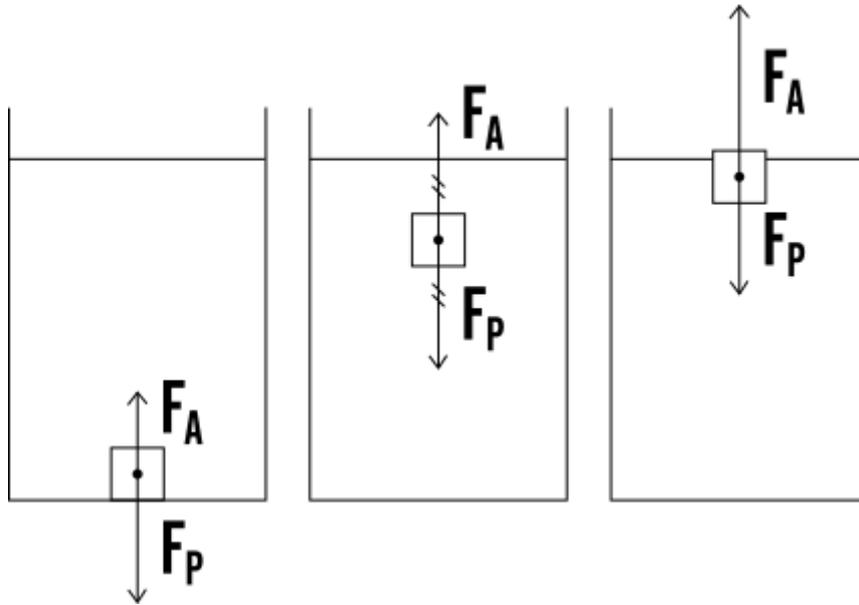


Figura 21. galleggiamento di un corpo secondo il principio di Archimede

in cui vediamo che  $F_A$  è la forza di Archimede e  $F_p$  è la forza generata dal peso della condotta sessa (forza peso). Quindi notiamo che:

- se  $F_p > F_A$  il corpo tende ad affondare;
- se le due forze sono uguali, quindi stiamo parlando di uno stato di perfetto equilibrio, il corpo rimane fermo, in equilibrio, in qualunque posizione venga messo all' interno del fluido;
- se  $F_p < F_A$  il corpo immerso nel fluido tornerà subito in superficie. In quest' ultimo posizionamento ci sarà una condizione di perfetto equilibrio e il corpo sarà, di conseguenza, in equilibrio.

Possiamo calcolare la spinta di galleggiamento con la seguente formula analitica:

$$W_w = \gamma_w \cdot D_e^2 \cdot \pi / 4$$

In cui  $W_w$  indica la spinta di galleggiamento per unità di lunghezza e  $\gamma_w$  il peso specifico dell' acqua.

#### 4.6.3) Peso del rinterro

Il peso del rinterro, insieme al peso della tubazione stessa, agisce dall' alto verso il basso e tende ad avere un effetto stabilizzante sulla condotta stessa.

Considerando che il peso del rinterro viene compattato, per evitare, ad esempio, che ci siano eccessivi vuoti all' interno di esso, notiamo che la spinta varia in funzione del peso specifico dei grani che costituiscono il rinterro stesso, del diametro di tali grani e del grado di compattazione.

Dobbiamo considerare che il peso del rinterro si divide in due parti principali: la prima è la parte immersa nell' acqua di falda e la seconda parte è la parte di terreno di rinterro asciutto. Ovviamente, dovremmo calcolare in maniera separata la spinta che le due parti vanno a generare sulla condotta stessa.

Possiamo ricavare il peso del riempimento, che genera la spinta, immerso nell' acqua di falda tramite la seguente formula analitica:

$$W'=\gamma' \cdot [D_e^2/(2-\pi/8)+H_f \cdot D_e]$$

in cui:  $W'$  è il peso del rinterro immerso nell' acqua di falda per unità di lunghezza;  $\gamma'$  è il peso specifico del rinterro;  $H_f$  è l' altezza del rinterro, considerato dalla generatrice superiore della condotta e la superficie libera della falda.

Possiamo infine ricavare il peso del rinterro che si trova sopra all' acqua di falda e che è, di conseguenza, completamente asciutto, con la seguente formula analitica:

$$W_D=\gamma_D \cdot D_e^2 \cdot (H-H_f)$$

in cui:  $W_D$  è il peso del rinterro posto superiormente alla falda per unità di lunghezza;  $\gamma_D$  è il peso specifico del terreno secco; infine  $H$  è l' altezza effettiva del rinterro.

Totalmente quindi il peso del rinterro sarà la somma dei due valori sopra ricavati analiticamente. Possono esserci dei casi particolari, tali per cui, ad esempio, se il livello della falda coincide con il piano campagna (quindi significa logicamente che  $H=H_f$ ) abbiamo che  $W_{TOT}=W'$ .

Prima di andare avanti con tale paragrafo, facciamo una spiegazione sul calcolo dei pesi specifici che abbiamo definito in questo capitolo. Il tutto si basa su una formula analitica e sulla definizione di un parametro cioè il peso specifico relativo dei grani GS il quale è pari al rapporto tra il peso specifico dei grani ( $\gamma_s$ ) e il peso specifico dell' acqua. In generale il peso specifico del rinterro è pari a:

$$\gamma'=\gamma_D-\gamma_w \cdot \gamma_D/\gamma_s=\gamma_D \cdot (1-1/GS)$$

Possiamo chiudere tale paragrafo definendo nella realtà come vengono effettuati i calcoli. Considerando che tendenzialmente i terreni sono caratterizzati da una mancanza di uniformità, andremo ad applicare un coefficiente di sicurezza FS che è pari a un valore che va da 1 a 1,5. Verrà usato il valore 1 se il peso della condotta è la principale forza agente contro la flottazione.

Viene usato il fattore pari a 1,5 se sono le forze di attrito tra i grani, definite anche forze di coesione, le principali forze resistenti alla flottazione. Definiamo flottazione quel fenomeno di insuflazione di un gas all' interno della condotta al fine di separare il nostro liquido dalle sostanze inquinanti.

#### 4.6.4) Verifica al galleggiamento

Abbiamo spiegato nei paragrafi precedenti quindi i fattori che influenzano, maggiormente, la verifica al galleggiamento e abbiamo capito la sua importanza, soprattutto nel caso di terreni costituenti di falda. Per assicurarsi che la verifica vada a buon fine è necessario che venga verificata la condizione successivamente scritta:

$$W_p-W_w+W_{TOT}/FS > 0$$

in cui abbiamo le forze stabilizzanti che devono essere maggiori della forza insablizzante. Se questo avviene avremo che la tubazione non galleggerà.

Può capitare, ovviamente, che le forze stabilizzanti non siano sufficienti, e quindi bisogna garantire delle misure cautelative al fine di evitare il fenomeno del galleggiamento. Per evitare quindi il fenomeno possiamo:

- aumentare lo spessore del tubo;
- inserire dei collari prefabbricati in cls;
- collegare delle piastre di ancoraggio in cls.

## CAPITOLO 5: BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- <https://www.progettoicar.it/2021/01/15/falde-acquifere-cosa-sono-e-come-si-formano/>
- <https://www.vermeeritalia.it/tecnologie-vermeer/scavo-di-trincea-trencher/>
- La posa in opera e collaudo di tubazioni in PVC per fognatura, Editing editoriale a cura di Ing. Marco Piana
- [https://link.springer.com/chapter/10.1007/88-470-0356-3\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/88-470-0356-3_6)
- [https://www.refill-tech.it/PDF/Trincee\\_Drenanti.pdf](https://www.refill-tech.it/PDF/Trincee_Drenanti.pdf)
- [https://www.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life\\_Metro\\_Adapt/documenti/TRINCEE-INFILTRANTI\\_fin.pdf](https://www.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life_Metro_Adapt/documenti/TRINCEE-INFILTRANTI_fin.pdf)
- [https://www.legislazionetecnica.it/bcksistemone/files/regulations/pdf/XLMRG23N20177\\_P10.pdf](https://www.legislazionetecnica.it/bcksistemone/files/regulations/pdf/XLMRG23N20177_P10.pdf)
- [https://www.superbloppiccinini.it/Regole\\_Posa\\_Tubi.pdf](https://www.superbloppiccinini.it/Regole_Posa_Tubi.pdf)
- <https://crewell.it/manuale-tecnico/metodi-per-il-controllo-dellacqua-di-falda/>
- <https://www.geofondazioni.it/diaframmi/>
- [https://www.edilportale.com/news/2019/12/focus/consolidamento-terreni-le-soluzioni-tecniche\\_73852\\_67.html](https://www.edilportale.com/news/2019/12/focus/consolidamento-terreni-le-soluzioni-tecniche_73852_67.html)
- [https://www.paladeri.it/polietilene\\_paladex.php?r=rigidita\\_anulare](https://www.paladeri.it/polietilene_paladex.php?r=rigidita_anulare)
- <https://www.aup.it/wp-content/uploads/2012/04/Lezione6A-B.pdf>
- <https://crewell.it/impianti-di-drenaggio-wellpoint-e-pozzi/>
- <https://www.gresnews.it-posa-tubazioni-rigide-falda.pdf>